

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНВЕРТОРНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ ФЕС ВІД РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

Гаєвська Г.М., ст. викл., Гаєвський О.Ю., проф., Іняткіна М.В., студент  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

**Вступ.** Останнім часом в Україні масово встановлюються фотоелектричні станції (ФЕС) невеликої потужності, підключені до розподільних мереж (РМ), що пов'язано зі зниженням вартості фотоелектричних модулів та підтримкою державою впровадження відновлювальних джерел енергії. Однак при збільшенні сумарної потужності ФЕС та зростанні ступеня їхнього проникнення в енергосистему, вони призводять до ймовірного збільшення напруги у вузлах підключення [1, 2]. Ці ефекти обумовлені не тільки впливом генерації ФЕС, но і параметрами електричної мережі. Тому зміни профіля напруги РМ з підключенням ФЕС треба аналізувати з урахуванням як балансу енергії фотогенерації і споживання у вузлах, так і характеристик самої мережі.

**Мета роботи.** Дослідження впливу параметрів обладнання розподільної мережі на регулювання напруги у вузлу під час пікової генерації та на інверторні відключення від мережі, які знижують ефективність роботи ФЕС.

**Матеріали і результати досліджень.** Системи захисту станцій забезпечують автоматичне відключення ФЕС від мережі (режим «островкування», islanding) [3, 4]. Відключення інверторів ФЕС, відбувається при виході значення напруги та частоти змінного струму за допустимі значення для інверторного обладнання.

На рисунку 1а показані моніторингові дані для інвертора номінальної потужності 30 кВт. Декілька разів за добу при високому рівні сонячної радіації можна спостерігати відключення від мережі (нульові значення вихідної потужності  $P$ ), які відбуваються на стороні інвертора. Островкування спостерігаються, коли перевищення вихідних лінійних значень напруги над номінальним становить від 8% до 10%, а саме коли на низьковольтній стороні інверторного підключення з номінальною лінійною напругою 380 В напруга перевищує максимально допустиме значення 410 В (+ 10% від номінального).

Зміна потужності  $P(t)$  показана у вигляді заштрихованої області. Штриховий лінією показано зміна середнього фазного струму

$$\bar{I}_\phi(t) = \frac{1}{3}(I_A(t) + I_B(t) + I_C(t)). \quad (1)$$

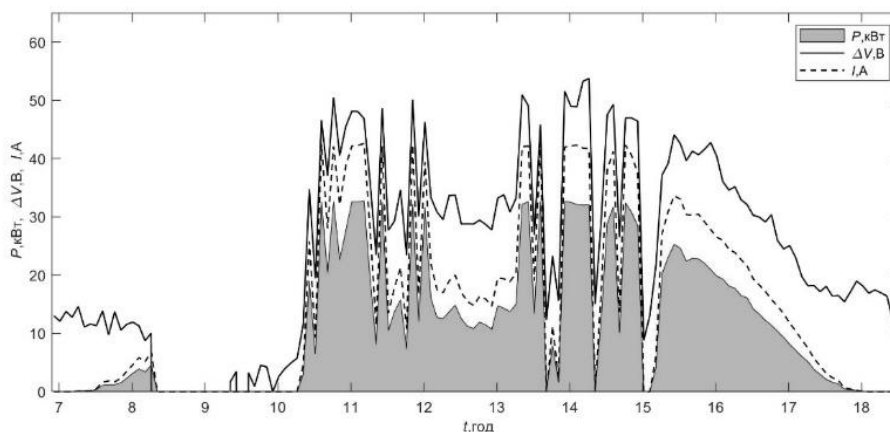
Приріст середньої лінійної напруги щодо мінімального середнього значення в даний день дорівнює

$$\Delta V(t) = \frac{1}{3}(V_{AB}(t) + V_{BC}(t) + V_{CA}(t)) - \bar{V}_{\min}, \quad (2)$$

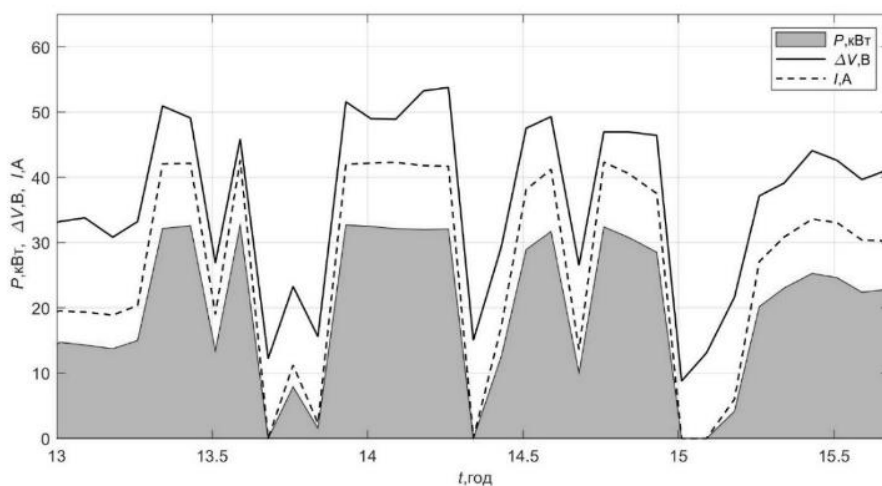
де

$$\bar{V}_{\min} = \frac{1}{3} \min_{t \in \Delta T} \{V_{AB}(t) + V_{BC}(t) + V_{CA}(t)\}, \quad (3)$$

$\Delta T$  - загальний період моніторингу. Вимірювання у даному прикладі моніторингу проводились з інтервалом 5 хвилин.



а



б

Рисунок 1 – Графіки вихідної потужності інвертора  $P(t)$ , середніх поточних значень фазного струму і збільшення середньої вихідної лінійної напруги інвертора, викликаного генерацією (підвищувальний трансформатор 0.4/10 кВ, 120кВА): а - дані за період спостереження; б - дані в збільшеному за часом масштабі.

Фактичне перебування фотоелектричної системи в стані островкування може бути більш тривалим, ніж дають таблиці моніторингу. Автоматичні вимірювання (відлік) осереднюються та виводяться через 5 хвилин. Це значно перевищує інтервал між автоматичними повторними спробами інвертора підключення до мережі, які починаються приблизно через півхвилини після відключення і тривають згідно з регламентом конкретного інвертора. Крім того, перевищення напруги в моменти відключення можуть бути більшими, ніж на 8–10 відсотків, які отримуються в результаті п'ятихвилинного усереднення.

Для кількісного аналізу зміни напруги у вузлу підключення ФЕС до розподільної мережі при різних рівнях потужності генерації фотомодуля була

створена модель, в якій інвертор ФЕС підключений до підвищувального трансформатора  $T_2$  через короткий відрізок з'єднувальної лінії з імпедансом  $Z_{L2}$ . До низьковольтної сторони трансформатора  $T_2$  може бути підключене місцеве навантаження  $S_{2L}$ , а високовольтна сторона  $T_2$  з'єднана з радіальною лінією імпедансом  $Z_{L1}$ , яка протягнута від  $T_2$  до підстанції (ПС)  $T_1$ . Підстанція, до якої підключені інші споживачі розподільної мережі ( $S_{1L}$  на схемі), забезпечує вихід в більш потужну мережу.

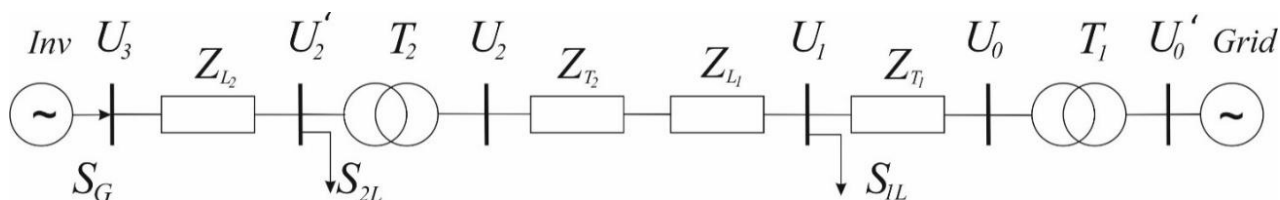


Рисунок 2 – Схема підключення ФЕС до розподільної мережі 10 кВ, яка живиться від підстанції 10/35 кВ

При переході до відносних одиниць схема була скорочена до модельної схеми з трьома вузлами: трансформатор  $T_1$ , трансформатор  $T_2$  і інвертор. Змінення параметрів ПС, згідно розрахункам, незначно впливає на напругу  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$ . Були виконані розрахунки усталених режимів ФЕС з піковою потужністю 30 кВА, яка підключена до симетричної трифазної лінії  $L_2$  при різних параметрах трансформаторів  $T_2$  0.4/10 кВ з потужністю від 25 до 100 кВА, та проаналізовано вплив довжини ліній  $L_1$  і  $L_2$ , прокладених проводами типу АС і СІП відповідно.

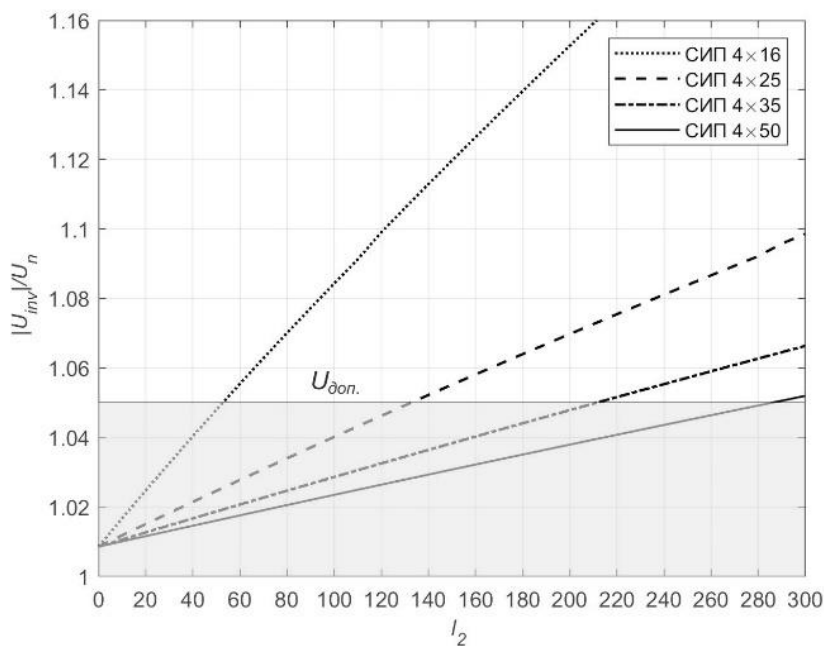


Рисунок 3: а – залежність відносної вихідної напруги  $U_{inv}/U_n$  від рівня активної генерації  $P_{inv}/S_n$  при різних типах з'єднувальних проводів лінії  $L_2$ ; б – залежність  $U_{inv}/U_n$  від довжини лінії  $L_2$  при різних типах проводів. Трансформатор  $T_2$  40 кВА, 0.4/10 кВ, довжина лінії  $L_1$  – 15 км (провід АС-25).

Отже найбільший вплив на напругу у вузлу підключення має відрізок з'єднувального кабелю  $L_2$  між інвертором і трансформатором  $T_2$  (Рис.3). На практиці у більшості випадків підключення фотоелектричних станцій потужністю 30 кВт до трансформатора розподільчої мережі виконуються самонесучим ізольованим проводом СІП з перетином фазних жил від 16 до 35 мм<sup>2</sup>. На графіку рисунку 3 показані результати розрахунку залежності вихідної напруги інвертора від активної потужності генерації (в відносних одиницях) для двох типів проводів СІП 4×16 і СІП 4×25 довжиною 200 м. Можна побачити, що при заданих параметрах ліній і трансформаторів та при генерації активної потужності рівної номінальній перевищення вихідної напруги інвертора над номінальною складає 7% та 15% для СІП 4×25 і СІП 4×16 мм<sup>2</sup> відповідно. Таким чином, лінія  $L_2$  інверторного підключення може впливати на перенапруги у точці інверторного підключення значно сильніше, ніж мережеве обладнання  $T_2$ ,  $L_1$ ,  $T_1$ .

**Висновки.** Досліджено вплив на напругу в спільній точці інверторного підключення до РМ у випадках різних параметрів мережевого обладнання при номінальній потужності інвертора 30 кВт. Показано що основну роль в перевищенні напруги над допустимим може грати імпеданс з'єднувального проводу  $L_2$  між точкою підключення і підвищувальним трансформатором. Отримані граничні значення довжини  $L_2$  при різних типах з'єднувальних проводів типу СІП, які відповідають утриманню напруги у допустимих межах.

#### Перелік посилань

1. P. M. S. Carvalho, P. F. Correia, and L. A. F. Ferreira, Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks // IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 2, pp. 766–772, May 2008;
2. M.A. Eltawil, Z. Zhao. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 112–129.
3. А.Ю. Гаевский, В.В. Бодняк, А.Н. Гаевская. Анализ мониторинговых данных о работе PV-инверторов, подключенных к распределительной сети // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2018, № 31-36, с. 279-284.
4. F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi and G. Ronda. Integration of large-size photovoltaic systems into the distribution grids: a P–Q chart approach to assess reactive support capability // IET Renew. Power Gener., 2010, Vol. 4, Iss. 4, pp. 329–340.